

## **ESTIMACIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL PARA VARIAS LOCALIDADES DE LOS VALLES CALCHAQUÍES, NOROESTE DE ARGENTINA**

**Nieves Ortiz de Adler<sup>1</sup>, María L. Molina<sup>1</sup> & Federico Aiquel<sup>2</sup>**

*(1) Laboratorio de Física de la Atmósfera, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.*

*nadler@herrera.unt.edu.ar – marialaura.molina@gmail.com*

*Avda. Independencia 1800 (4000) S. M. de Tucumán- (0381) 4364093 Interno 7828*

*(2) Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán  
federicoaiquel@argentina.com*

**RESUMEN** Se estima radiación solar global sobre una superficie horizontal, para cielo todo el día sin nubes, de 3 localidades de los Valles Calchaquíes: Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, Noroeste de Argentina. Se usa un modelo semi empírico de fácil implementación en PC, que requiere: latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, heliofanía efectiva, día del año y el factor de turbidez de Linke. Para cada día del año se calcula, cada 15 minutos, la irradiancia global. Los valores son integrados con un método numérico, obteniéndose los máximos valores posibles de irradiación, determinando las expectativas de valores de radiación, siempre por debajo de esta cota. Con datos de nubosidad de Santa María se realiza una estimación gruesa de la atenuación de radiación por efectos de nubosidad. Los valores de irradiación anuales así obtenidos, son 1.91 MWhm<sup>-2</sup>, 1.95 MWhm<sup>-2</sup> y 1.92 MWhm<sup>-2</sup>, para Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, respectivamente. Para San Carlos, Salta, localidad de los Valles Calchaquíes donde existen datos experimentales disponibles de radiación, se estima 1.92 MWhm<sup>-2</sup> anuales, siendo el valor medido 1.85 MWhm<sup>-2</sup> anuales.

**Palabras clave:** energía solar, modelización. Noroeste argentino.

### **INTRODUCCION**

Los estudios sobre el medio ambiente son temas preponderantes a nivel mundial, especialmente por la búsqueda de nuevos recursos energéticos. Es de particular interés en zonas rurales la conversión fotovoltaica de la energía solar, para iluminación, calefacción, bombeo de agua, etc. En nuestro país este interés se ha concretado en un programa de alcance nacional en el área de electrificación rural por medio de sistemas fotovoltaicos. Se trata del Proyecto PERMER (Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales) de la Secretaría de Energía de la Nación, iniciado en Octubre de 1999.

En particular en la zona de los Valles Calchaquíes se han iniciado en 2009 actividades del Grupo de Turismo Rural de Tafi del Valle para poner en marcha el Plan de Implementación de Energías Renovables en el Turismo Rural. El equipo técnico del Plan está integrado por representantes de la Facultades de Arquitectura y Urbanismo y de Ciencias Exactas y Tecnología, de la UNT; la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Nación (SECyT), la Secretaría de Estado de Innovación y Desarrollo Tecnológico (SIDETEC), Tucumán; el INTA y el CONICET. Las localidades objeto de este estudio fueron elegidas dentro de los Valles Calchaquíes que abarcan tres provincias (Salta, Catamarca y Tucumán) y nace del ámbito mismo de esta iniciativa.

Para cuantificar el nivel de irradiación solar en determinadas zonas pueden usarse cartas solarimétricas. Pero su trazado requiere una buena base de datos y un conocimiento empírico de la meteorología de la zona de interés. En presencia de grandes masas boscosas, de montañas y de microclimas, se requieren datos solares proporcionados por estaciones terrenas (Grossi Gallegos y Righini, 2002). En el Noroeste de Argentina no existen registros de radiación solar en todas las estaciones meteorológicas.

Las técnicas de interpolación, los datos satelitales de irradiancia o los modelos son alternativas para conocer el recurso solar en lugares donde no hay datos experimentales in situ. Desde las dos últimas décadas hubo un progreso significativo en el desarrollo del modelado de radiación solar (Dubayah and Rich, 1995; Muneer, 1997; Hofierka, 1997; Rivington et al., 2005; Loutzenhiser et al., 2007) debido a las estimaciones precisas y rápidas que éstos proporcionan. En este trabajo se utiliza un modelo propio (Ortiz de Adler, et al., 2007) con el cual se puede realizar estimaciones orientadoras de radiación solar directa, difusa y global sobre una superficie horizontal, para cielo sin nubes (todo el día, todo el cielo sin nubes).

### **LOCALIDADES DE LOS VALLES CALCHAQUIES ELEGIDAS**

Los Valles Calchaquíes son un sistema de valles y montañas de 520 Km de largo que se extienden longitudinalmente de Norte a Sur por las provincias de Salta, Catamarca y Tucumán. El valle constituye la red de drenaje que conforma los ríos Calchaquí y Santa María que forman parte de la alta cuenca del río Juramento.

Las localidades de interés en este trabajo, ubicadas dentro de los valles Calchaquíes, son de Norte a Sur: San Carlos (25.92°S; 66.08°W; 1607 msnm - Salta), Colalao del Valle (26.36°S; 65.95°W; 1698 msnm - Tucumán), Amaicha del Valle (26.60°S; 65.91°W; 1981 msnm - Tucumán) y Santa María (26.70°S; 66.05°W, 1886 msnm - Catamarca).

La Sierra de Quilmes o del Cajón limita el valle hacia el Oeste entre San Carlos y Santa María, en tanto que hacia el Este están la Sierra de León Muerto primeramente y luego las cumbres Calchaquíes.

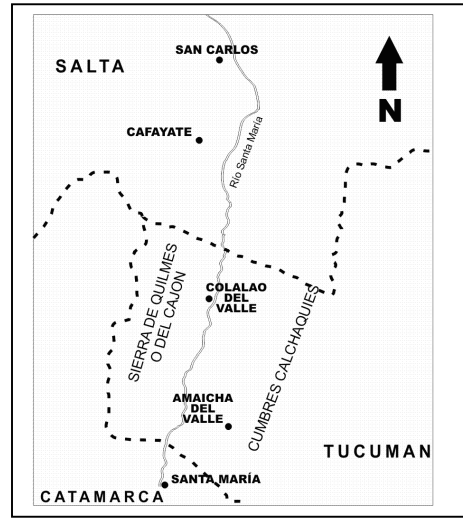


Figura 1. Croquis indicativo de la ubicación de las localidades de los Valles Calchaquíes (NOA): San Carlos, Cafayate, Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María. El río Santa María corre en el centro del valle, de Sur a Norte.

Al Oeste de San Carlos se tiene una altitud de 3000 msnm a unos 12 km de distancia y hacia el Este altitudes de 3100 msnm a 15 km. En Colalao del Valle al Oeste se tienen altitudes de 2950 msnm a 10 km y 2750 msnm a 17 km al Este. Para Amaicha del Valle se tiene una altitud de 2700 msnm de la Sierra de Quilmes a 22 km al Oeste y 2150 msnm a 20 km al Este (cumbres Calchaquíes). En Santa María la Sierra de Quilmes tiene alturas de 3400 msnm a una distancia aproximada de 14 km y hacia el Este las estribaciones de la Sierra de Muñoz alcanzan altitudes de 3400 msnm a aproximadamente 21 km de distancia.

Puede considerarse que todas las localidades tienen barreras orográficas de aproximadamente 10° respecto del horizonte, tanto al Este como al Oeste.

### MODELO UTILIZADO

El modelo que se utiliza en este trabajo (Ortiz de Adler, et al., 2007) es un modelo semi empírico que estima irradiancia para todo el cielo sin nubes. Requiere: latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, heliofanía efectiva, día del año y el factor de turbidez de Linke. Es un modelo de fácil implementación en PC, que toma del modelo de radiación solar r.sun implementado por el GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System - Geographic Information System, <http://grass.itc.it.html>) las ecuaciones para la estimación de la radiación solar directa, pero considera el modelo de Dumortier (1995) para estimar la irradiancia solar difusa.

Las ecuaciones (1) y (2) permiten estimar la irradiancia solar directa  $I_b$  y difusa  $I_d$ , respectivamente, sobre una superficie horizontal para cielo sin nubes. La irradiancia global es  $I_g = I_b + I_d$ . La ecuación (1) resulta del modelo de Page (1986).

$$I_b = I_0 \sin \alpha \left[ \exp(-0.8662 m \delta_R(m) T_L(2)) \right] \quad (1)$$

La irradiancia solar difusa se estima con la ecuación (2) dada por el modelo de Dumortier, (1995).

$$I_d = I_0 \left[ 0.0065 + (-0.045 + 0.0646 T_L(2) \sin \alpha - (-0.0014 + 0.0327 T_L(2) \sin^2 \alpha)) \right] \quad (2)$$

Los parámetros que aparecen en (1) y (2) están indicados en las ecuaciones (3) a (8).

Variación de la radiación solar en el tope de la atmósfera,  $I_0$  en función del día del año,  $n_d$  (1 a 365)

$$I_0 = 1367 (1 + 0.03344 \cos(2 \pi n_d / 365.25 - 0.048869)) \quad (3)$$

La altura del sol  $\alpha$  se estima como

$$\alpha = \arcsen(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (4)$$

Donde  $\phi$  es la latitud, y  $\omega$  el ángulo horario, dado por

$$\omega = 0.261799 (t - 12) \quad (5)$$

La declinación solar,  $\delta$  es:

$$\delta = \arcsen\{0.3978 \sin[2 \pi n_d / 365.25 - 1.4 + 0.0355 \sin(2 \pi n_d / 365.25 - 0.0489)]\} \quad (6)$$

La masa óptica de aire  $m$  dada por la aproximación de Kasten y Young (1989), es:

$$m = \exp(-h/8431) \left[ \sec \alpha + 0.50572 (6.07995 + \alpha)^{-1.6364} \right] \quad (8)$$

Para el espesor óptico de Rayleigh,  $\delta_R$  (m) se utilizó la fórmula mejorada de Kasten (1996):

$$\delta_R(m) = (6.6296 + 1.7513 m - 0.1202 m^2 + 0.0065 m^3 - 0.0013 m^4)^{-1} \text{ para } m \leq 20$$

$$\delta_R(m) = (10.4 + 0.718 m)^{-1} \text{ para } m \geq 20 \quad (9)$$

$T_L(2)$  es el factor de turbidez de Linke (1922) normalizado para masa de aire 2 (Kasten, 1996). Describe el espesor óptico debido a absorción y dispersión en una atmósfera sin nubes, pero que tiene vapor de agua, polvo y aerosoles, relativo al de una atmósfera seca y limpia (atmósfera de Rayleigh). Los valores de  $T_L(2)$  se obtienen de manera gratuita del servicio SoDa (Solar Data, de la European Commission, <http://www.soda-is.com/eng/index.html>), y corresponden al año 2005.

El desempeño del modelo fue evaluado con datos de la Base Nacional de Datos de Radiación Solar (NSRDB) de EEUU y de estaciones europeas (Molina, M. L., 2008). La Tabla 1 muestra la correlación de datos teóricos y experimentales de 19 estaciones de la NSRDB, ubicadas entre los paralelos 25°N a 47°N y longitud entre 71°W y 122°W; alturas entre 2 msnm  $\leq h \leq$  1870 msnm y con diferentes climas. Se eligieron datos de las 12hs solar, por tratarse de valores referenciales máximos. Datos de 2006. La Tabla 1 muestra que las diferencias entre valores estimados y reales son menores o iguales al 7%.

| Estación     | $\frac{I_{g, \text{csn}} - I_{g, \text{exp}}}{I_{g, \text{csn}}} 100$ | Estación       | $\frac{I_{g, \text{csn}} - I_{g, \text{exp}}}{I_{g, \text{csn}}} 100$ |
|--------------|---|----------------|---|
| Albuquerque  | 4%  | Kansas City    | 4%  |
| Bismark      | 5%  | Minneapolis    | 5%  |
| Boston       | 5%  | Pendleton      | 2%  |
| Cheyenne     | 3%  | Phoenix        | 5%  |
| Columbia     | 7%  | Sacramento     | 6%  |
| Duluth       | 6%  | Salt Lake City | 4%  |
| El Paso      | 5%  | San Antonio    | 7%  |
| Helena       | 4%  | Seattle        | 5%  |
| Houston      | 6%  | St. Louis      | 3%  |
| Jacksonville | 6%  |                |   |

Tabla 1. Diferencia porcentual máxima entre el valor estimado de irradiancia solar global ( $I_{g, \text{csn}}$ ) y el valor experimental,  $I_{g, \text{exp}}$ , respecto del valor estimado. Para cielo sin nubes, a las 12 hora solar (Molina, M. L., 2008).

El modelo también fue evaluado con datos de Tucumán (Molina y Ortiz de Adler, 2009). Se utilizó la información registrada en el periodo 01/01/2006 - 11/05/2009 con un piranómetro Davies (DS6450) de fotodiodo de silicio. El instrumento estaba emplazado en “El Colmenar”, estación de la Red Agrometeorológica de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán. La Figura 2 muestra los valores de irradiancia solar global de las 12 hs solar para cielo sin nubes: a) promedio mensual experimental,  $\bar{I}_{g, \text{csn}}$  (experimental), b) valores teóricos para cada día del año,  $I_{g, \text{csn}}$  (teórico). La recta  $\bar{I}_{g, \text{csn}} \text{ (experimental)} = (1.01 \bar{I}_{g, \text{csn}} \text{ (teórico)} + 56.19) \text{ Wm}^{-2}$  ( $R^2 = 0.98$ ), da la correlación entre el promedio mensual de datos experimentales y teóricos.

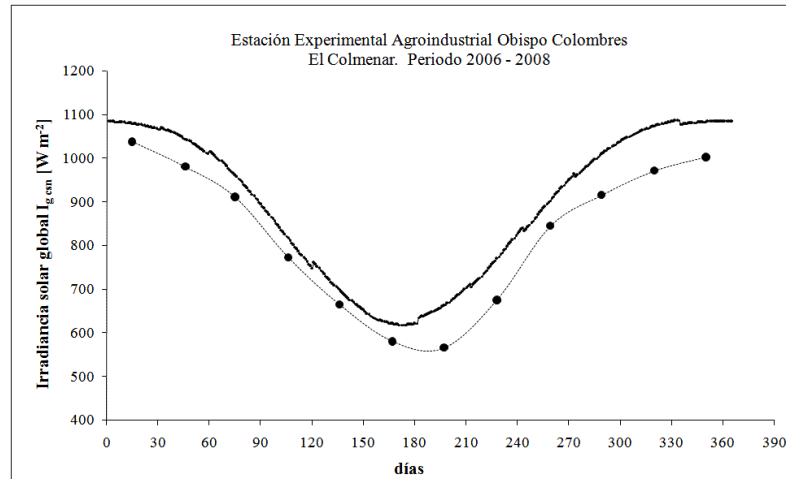


Figura 2. Irradiancia solar global de las 12 horas solar para cielo sin nubes. Círculos: valor medio mensual experimental de la EEAOC de Tucumán, periodo 2006-2008, rango espectral ( $400 \leq \lambda \leq 1100$ ) nm. Línea llena: valores teóricos de todos los días del año.

## CALCULOS Y RESULTADOS

Se estimó el valor de la irradiancia global en condiciones de cielo sin nubes,  $I_{g, \text{csn}}$   $\text{Wm}^{-2}$ , cada 15 minutos para todos los días del año, para las localidades de Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, lugares donde no se dispone de datos de radiación solar. Para el caso de un día completo con cielo sin nubes, la irradiación global diaria,  $H_{g, \text{csn}}$  es la integral

$$H_{g, \text{csn}} = \int_{t_1}^{t_2} I_{g, \text{csn}} dt.$$

Se estiman los límites de integración ( $t_1$  y  $t_2$ ) para las 3 localidades, los que dependen de las coordenadas del lugar, día del año y de las sombras producidas por las montañas cercanas. El procedimiento consiste en calcular el ángulo horario, altura y azimut solar desde la salida a la puesta del Sol e identificar en un diagrama altura azimut solar la ubicación de las barreras orográficas del lugar. La integración fue realizada utilizando el método de integración numérica de Simpson. Se calcula el área de la curva de irradiancia en función de las horas del día, dividiéndola en trapecios cuya altura es de 15 minutos.

Con los valores diarios de  $H_{g, \text{csn}}$  se obtiene el promedio mensual:  $\bar{H}_{g, \text{csn}}$ .

Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María tienen latitud, altura y factor de turbidez similar, razón por la cual se obtuvieron valores teóricos de irradiación, también muy similares. Los valores de  $\bar{H}_{g, \text{csn}}$  de Amaicha del Valle (1981 msnm) son ligeramente mayores que los de Santa María (1886 msnm) y que los de Colalao del Valle (1698 msnm) (Figura 2).

Con el propósito que en la gráfica se distingan los valores de irradiación promedio mensual de cada una de las tres localidades se graficó  $\bar{H}_{g, \text{csn}}$  de Colalao del Valle, que tiene los menores valores de irradiación, en el eje de las ordenadas de la izquierda (curva superior de la Figura 3). En la misma figura, pero en el eje de las ordenadas de la derecha, se lee la diferencia entre a los valores de irradiación estimados para Amaicha del Valle y los correspondientes de Colalao del Valle (curva intermedia). También está graficada la diferencia entre a los valores de irradiación estimados para Santa María y los correspondientes de Colalao del Valle (curva inferior).

Así, por ejemplo,  $\bar{H}_{g, \text{csn}}$  para Amaicha del Valle en el mes de Enero es la suma del valor de irradiación estimado para Colalao del Valle ( $9 \text{ kWhm}^{-2}$ ) al que se le suma  $0.25 \text{ kWhm}^{-2}$  (valor que se lee en el eje de las ordenadas de la derecha). Por lo tanto la irradiación promedio mensual de Enero, para todo el día todo el cielo sin nubes, para Amaicha del Valle, es  $9.25 \text{ kWhm}^{-2}$ . Para el caso de Santa María, la irradiación promedio mensual de Enero, para todo el día todo el cielo sin nubes, es  $(9 + 0.10) \text{ kWhm}^{-2} = 9.10 \text{ kWhm}^{-2}$ .

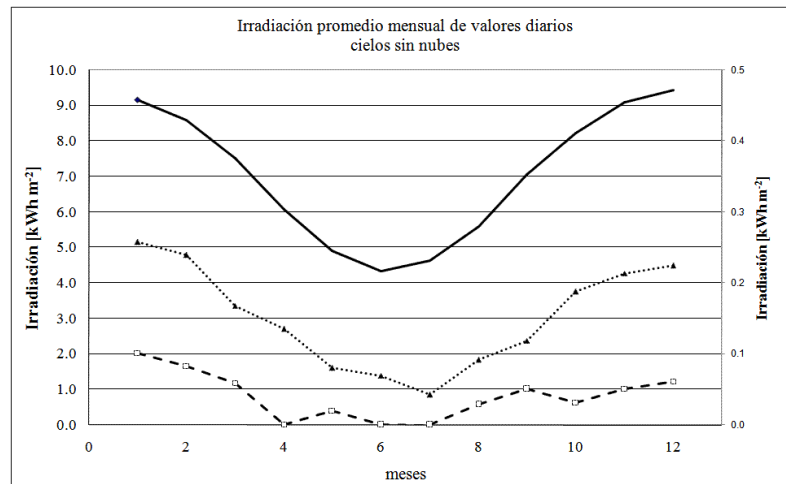


Figura 3. Irradiación promedio mensual de valores diarios,  $\overline{H}_{g,csn}$  ( $\text{kWhm}^{-2}$ ). Línea llena: Colalao del Valle (escala izquierda). Línea de puntos: diferencia entre los valores de  $\overline{H}_{g,csn}$  de Amaicha del Valle y los de Colalao del Valle (escala derecha). Línea de trazos: diferencia entre los valores de  $\overline{H}_{g,csn}$  de Santa María y los de Colalao del Valle (escala derecha).

Si durante todo el día de todos los días del año hubiera cielo despejado, la energía solar media recibida anualmente sobre un plano horizontal sería: a) para Colalao del Valle:  $2.54 \text{ MWhm}^{-2}$ ; b) para Amaicha del Valle  $2.59 \text{ MWhm}^{-2}$  y c) para Santa María  $2.55 \text{ MWhm}^{-2}$ .

### CONSIDERACION DE NUBOSIDAD

Para disponer de valores más realistas de la irradiación sobre cada una de estas localidades, se debería tener en cuenta la nubosidad, pero los modelos teóricos que la incluyen son muy complejos.

Santa María es la única localidad para la cual fue posible realizar una estimación gruesa de la atenuación de radiación por efectos de nubosidad, y por lo tanto una aproximación al valor real de la irradiación promedio mensual, ( $\overline{H}_{g,Santa\ María}$ ), por la disponibilidad de datos locales de nubosidad.

La estimación consiste en afectar los valores estimados de  $\overline{H}_{g,csn}$  para Santa María, con el factor  $(10-N)/10$ , donde N es la nubosidad de Santa María (Tabla 2).

| E   | F   | M   | A   | M   | J   | J   | A   | S   | O   | N   | D   | Año |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3.6 | 3.3 | 2.5 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 2.2 | 2.9 | 3.3 | 2.3 |

Tabla 2. Nubosidad media en escala de 0 (cielo completamente despejado) a 10 (cielo completamente cubierto). Periodo 1928 - 1937 y 1941 - 1950. (Torres Bruchmann, 1983).

Los valores estimados de  $\overline{H}_{g,csn}$  y  $\overline{H}_{g,Santa\ María}$  en función de los meses del año, están graficados en las dos curvas superiores de la figura 4. La curva inferior de esta figura corresponde a datos experimentales del promedio mensual de la irradiación global diaria de San Carlos (Grossi Gallegos et al., 2009). Los registros fueron realizados con un Piranómetro de 2ª Clase, CMP3 Kipp & Zonen con respuesta espectral en el rango  $300 \leq \lambda \leq 2800 \text{ nm}$ .

Los valores de  $\overline{H}_{g,Santa\ María}$  fueron comparados con datos de San Carlos,  $\overline{H}_{g,San\ Carlos}$  (experimentales), obteniéndose  $\overline{H}_{g,Santa\ María} = (0.93 \overline{H}_{g,San\ Carlos} \text{ (experimentales)} + 0.63) \text{ kWh m}^{-2}$ , con  $R^2 = 0.95$ .

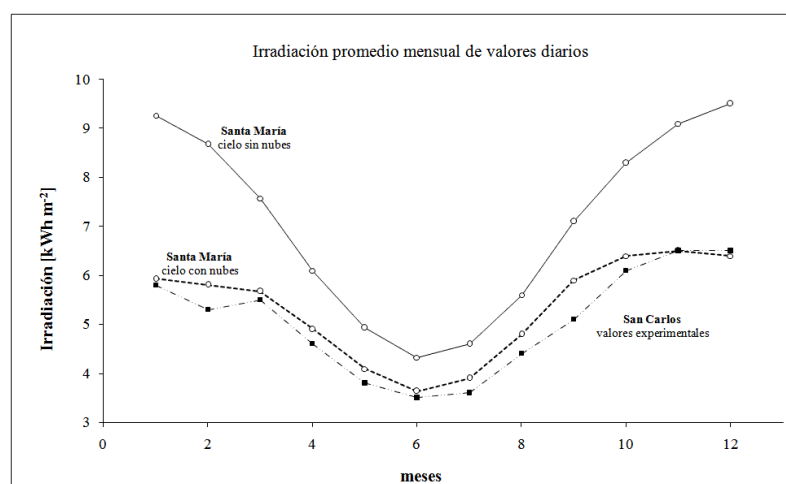


Figura 4. Irradiación promedio mensual de valores diarios. Estimaciones para Santa María: 1) línea llena (círculos vacíos) para todo el día de todos los días del mes con cielo sin nubes; 2) línea de puntos (círculos vacíos) considerando nubosidad. Datos experimentales de San Carlos: línea de trazos (círculos llenos).

Utilizando los datos de nubosidad de Santa María, se hace una estimación gruesa de la irradiación de todas las localidades consideradas en este trabajo. Este procedimiento implica la suposición que los sitios analizados tienen las mismas características de nubosidad. Dicha suposición se basa en las siguientes consideraciones:

El clima de los Valles Calchaquíes es de tipo BWkwb (Zuccardi y Fadda, 1972). Según la clasificación de Köppen (1948) son climas de desierto (BW), con temperatura media anual menor que 18° (k). En el mes más lluvioso de verano (Enero), las lluvias son 10 o más veces superiores a las que corresponden al mes seco (Agosto)(w). La temperatura media del mes más cálido es menor a 22°C.

En particular, la localidad de:

San Carlos, tiene temperaturas: a) media anual de 16.9°C; b) de los meses más calientes (Enero y Diciembre): 22.1°C; c) del mes más frío (Junio): 9.4°C. Precipitación total anual: 109.0 mm (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2003).

Colalao del Valle tiene temperaturas: a) media anual: 15.1°C; b) del mes más caliente (Enero): 21°C; c) del mes más frío (Julio): 9.2°C. Precipitación media de 200 mm (Zuccardi y Fadda, 1972).

Amaicha del Valle (clima de tipo BWkwb) tiene temperaturas: a) media: 15.6°C; b) mes más caliente (Enero): 22.2°C; c) mes más frío (Julio): 10.2°C, (1960 - 1976). Precipitación media: 160.1 mm, (1944 - 1976), Torres Bruchmann (1981).

San Carlos, Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María son localidades de los Valles Calchaquíes, con similares barreras orográficas, alturas sobre el nivel del mar y climas.

La Tabla 3 muestra la irradiación global total anual para San Carlos, Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, para: a) todo el día, de todos los días del año, con cielo sin nubes; b) considerando nubosidad; c) valor experimental.

| Localidad                        | (a)<br>Irradiación anual [MWhm <sup>-2</sup> ]<br>Teórico, con cielo sin nubes | (b)<br>Irradiación anual [MWhm <sup>-2</sup> ]<br>Teórico, con nubosidad | (c)<br>Irradiación anual [MWhm <sup>-2</sup> ]<br>Experimental |
|----------------------------------|--|--|--|
| San Carlos<br>(1607 msnm)        | 2.55   | 1.92   | 1.85   |
| Colalao del Valle<br>(1698 msnm) | 2.54   | 1.91   | -----  |
| Amaicha del Valle<br>(1981 msnm) | 2.59   | 1.95   | -----  |
| Santa María<br>(1886 msnm)       | 2.55   | 1.92   | -----  |

Tabla 4. Valores de irradiación solar global total anual para cuatro localidades de los valles Calchaquíes.

El valor experimental de la irradiación anual que figura en Tabla 4 fue calculado a partir de datos de irradiación global media diaria,  $\bar{H}_{g \text{ diaria}}(\text{exp})$  dados por Grossi Gallegos et al. (2009). La Tabla 5 muestra los valores de  $\bar{H}_{g \text{ diaria}}(\text{exp})$ , las estimaciones teóricas  $\bar{H}_{g \text{ diaria}}(\text{teórico})$  y el error porcentual entre datos medidos y estimados para San Carlos.

| San Carlos |   |   |            |           |   |   |            |
|------------|---|---|------------|-----------|---|---|------------|
| Meses      | $\bar{H}_g$ diaria (exp)<br>(Kwhm <sup>-2</sup> ) | $\bar{H}_g$ diaria (teórico)<br>(Kwhm <sup>-2</sup> ) | Error<br>% | Meses     | $\bar{H}_g$ diaria (exp)<br>(Kwhm <sup>-2</sup> ) | $\bar{H}_g$ diaria (teórico)<br>(Kwhm <sup>-2</sup> ) | Error<br>% |
| ENERO      | 5.8   | 5.9   | 2.2        | JULIO     | 3.6   | 3.9   | 7.7        |
| FEBRERO    | 5.3   | 5.8   | 8.8        | AGOSTO    | 4.4   | 4.8   | 8.3        |
| MARZO      | 5.5   | 5.7   | 3.1        | SETIEMBRE | 5.1   | 5.9   | 13.6       |
| ABRIL      | 4.6   | 4.9   | 6.1        | OCTUBRE   | 6.1   | 6.4   | 4.7        |
| MAYO       | 3.8   | 4.1   | 7.2        | NOVIEMBRE | 6.5   | 6.5   | 0.0        |
| JUNIO      | 3.5   | 3.6   | 3.6        | DICIEMBRE | 6.5   | 6.4   | -1.6       |

Tabla 5. Irradiación solar global media diaria para San Carlos. Valores experimentales (Grossi Gallegos et al., 2009), teóricos y errores porcentuales entre datos medidos y estimados.

## CONCLUSIONES

Se presentan estimaciones de irradiación solar global (directa + difusa) promedio mensual sobre una superficie horizontal para todo el día todo el cielo sin nubes para 3 localidades de los Valles Calchaquíes, Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, ubicadas entre 25.92 ° y 26.68 ° de latitud Sur, con alturas entre 1698 msnm y 1981 msnm, lugares de donde no se dispone de registros de radiación. Por tratarse de valores máximos posibles para cada localidad, queda establecido que las expectativas de valores de radiación estarán siempre por debajo de estas cotas. Las cotas máximas del promedio mensual de la irradiación solar diaria para Colalao del Valle; Amaicha del Valle y Santa María se muestran en la figura 3. Las cotas máximas de la irradiación solar global anual estimadas, son 2.54 MWhm<sup>-2</sup> anuales para Colalao del Valle; y 2.59 MWhm<sup>-2</sup> anuales para Amaicha del Valle y 2.55 MWhm<sup>-2</sup> anuales para Santa María.

La disponibilidad de datos de nubosidad en Santa María permitió realizar una aproximación a los valores reales de irradiación para esta localidad, mediante una estimación gruesa de la atenuación de radiación por efectos de nubosidad. Los valores así obtenidos fueron comparados con los únicos datos experimentales disponibles de la zona de los Valles Calchaquíes, registrados en San Carlos, en la suposición de condiciones de insolación similares. El valor de irradiación solar global estimado para Santa María es 1.92 MWhm<sup>-2</sup> anuales, y el medido en San Carlos es 1.85 MWhm<sup>-2</sup> anuales.

Bajo la hipótesis que los sitios analizados tienen las mismas características de nubosidad, se utilizan los datos de nubosidad de Santa María para hacer una estimación gruesa de los valores reales de irradiación solar global para San Carlos, Colalao del Valle y Amaicha del Valle, obteniéndose: 1.92 MWhm<sup>-2</sup> anuales (valor medido 1.85 MWhm<sup>-2</sup> anuales), 1.91 MWhm<sup>-2</sup> anuales y 1.95 MWhm<sup>-2</sup> anuales, respectivamente.

## REFERENCIAS

- Dubayah, R., Rich, P.M. (1995). *Topographic solar radiation models for GIS*. International Journal of Geographical Information Systems 9. 405 - 419.
- Dumortier, D. (1995). *Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments*. PhD Thesis, Université de Savoie, France, 350 pp
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2002). *Alternativa para una evaluación preliminar del recurso solar en zonas aisladas de Latinoamérica*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES, Vol. 10, 9 - 14.
- Grossi Gallegos, H; Aristegui R. y Righini R. (2009). *Análisis de la Radiación Solar Global en San Carlos, Salta*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES, Vol. 13.
- Hofierka, J. (1997). *Direct solar radiation modelling within an open GIS environment*. Proceedings of the Joint European GI Conference 1997, Vienna, 575 - 584.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Salta, Centro Regional NOA-Prosusnoa, 2003.  
[http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/resultados/nec\\_agualluvia/lluvias/sancarlos/sancarlos\\_datosclimaticos.htm](http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/resultados/nec_agualluvia/lluvias/sancarlos/sancarlos_datosclimaticos.htm)
- Kasten F. and Young T. (1989). *Revised optical air mass tables and approximation formula*, Applied Optics 28, 4735 - 4738.
- Kasten F. (1996). *The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness*, Solar Energy 56, 239-244.
- Köppen, W. (1948). *Climatología. México*. Fondo de Cultura Económica, pp 478.
- Linke, F. (1922). *Transmission Koeffizient und Trubungsfaktor*, Beitr. Phys. Atmos. 10, 91-103.
- Loutzenhiser, P.G., Manz H. C. Felsmann, P.A., Strachan, T. Frank and Maxwell G.M. (2007). *Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation*, Solar Energy 81, 254 - 267.
- Molina, M. L. (2008). *Modelo para Estimar Radiación Solar Global en una Atmósfera sin Nubes*, Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, UNT.
- Molina, M. L. y Ortiz de Adler, N. (2009). *Irradiancia global en Tucumán. Comparación de datos de una red agro meteorológica con datos teóricos*. Investigaciones en Facultades de Ingeniería, Tomo I, III-67.
- Muneer, T. (1997). *Solar Radiation and Daylight Models for Energy Efficient Design of Buildings*, Oxford (Architectural Press).
- Ortiz de Adler, N., Molina M.L. y Elías A.G. (2007). *Modelo para estimar la irradiancia solar en una atmósfera sin nubes*, Investigaciones en Facultades de Ingeniería, Tomo I, III - 78.
- Page J.K. (1986). *Prediction of solar radiation on inclined surfaces*. Series F. In: Solar Radiation Data. III Dordrecht, Holland: Reidel.
- Rivington, M., Bellocchi G., Matthews K.B. and Buchan.K. (2005). *Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations*, Agricultural and Forest Meteorology 132, 228 - 243.

- Torres Bruchmann E. A. (1981). *El clima de Amaicha del Valle y sus posibilidades agrícolas y ganaderas*. Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Publicación Especial N° 14.
- Torres Bruchmann E. A. (1983). *Rasgos Climáticos y Posibilidades Agrícola-Ganaderas de Santa María y Alrededores (Catamarca)*, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Publicación Especial N° 23.
- Zuccardi, R. B. y Fadda G. S. (1972). *Mapa de reconocimiento de suelos de la provincia de Tucumán*. Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Publicación Especial N° 3.

**ABSTRACT.** Global solar radiation for cloudless sky on a horizontal surface was estimated for three locations in the Valles Calchaquies: Colalao del Valle, Amaicha del Valle y Santa María, NW of Argentina. An easy implementation semi empirical PC model was used. The model requires: latitude, longitude, altitude above sea level, effective heliophany, day of the year and the Linke turbidity factor values. The irradiance for each day of the year was estimated every 15 minutes. Values were integrated with a numerical method to obtain the maximum possible values of irradiation for each locality, thus setting expected radiation values below this upper limit. Using data on cloudiness in Santa Maria, a rough estimation of radiation attenuation due to clouds effects was calculated. Values of total annual irradiation obtained, were  $1.91 \text{ MWhm}^{-2}$ ,  $1.95 \text{ MWhm}^{-2}$  and  $1.92 \text{ MWhm}^{-2}$ , for Colalao Valley, Amaicha Valley and Santa Maria, respectively. For San Carlos, Salta, in the Valles Calchaquies, where experimental solar data are available, the estimated annual irradiation is  $1.92 \text{ MWhm}^{-2}$ , being  $1.85 \text{ MWhm}^{-2}$  the measured value.

**Keywords:** solar energy, modeling. Northwestern Argentina.